e eletromagnético, deve-se verificar, também, o atendimento aos limites normalizados das tensões de restabelecimento para ensaios de interrupção de correntes induzidas eletromagneticamente, conforme a Tabela C.2 do Anexo C da norma ABNT NBR IEC 62271-102.

3.2.12.5. Apresentação dos Resultados

O resultado das simulações, conclusões e recomendações referente ao estudo das correntes e tensões induzidas em lâminas de terra das secionadoras pode ser apresentado juntamente com os estudos de TRT e no mesmo relatório. O item 8.7 deste documento apresenta sugestões de tabelas para a apresentação dos resultados desse tipo estudo.

3.2.13. Estudo de Coordenação de Isolamento

Este estudo objetiva avaliar as sobretensões que atingem os equipamentos das entradas de linha e do interior das subestações, em função da ocorrência de descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão a elas conectadas. Como produto desta análise, são estabelecidos os níveis básicos de isolamento (NBI) a ser especificados para os equipamentos da subestação, bem como as características nominais dos para-raios e recomendações quanto à sua localização (distâncias dos equipamentos) na instalação.

3.2.13.1. Aspectos Gerais

As descargas atmosféricas que atingem as instalações de transmissão podem ser classificadas como diretas e indiretas:

- As descargas diretas são as que atingem diretamente os cabos fases das linhas de transmissão e se caracterizam por ser de amplitude mais baixa. As correntes associadas às descargas diretas podem ser calculadas em função da distância de incidência, geralmente obtida pelo modelo eletrogeométrico. A referência [5.4] apresenta a metodologia completa, com as equações para a determinação das correntes de descargas diretas, considerando-se o citado modelo.
- As descargas indiretas ocorrem quando os surtos atmosféricos atingem os cabos para-raios ou o topo da torre da linha de transmissão, provocando a sua elevação de potencial e resultando em descarga entre os condutores de uma fase da linha e a torre, através da cadeia de isoladores da linha. A tensão de crista das descargas indiretas é função da magnitude da corrente de descarga, da impedância de surto dos cabos para-raios, da impedância de surto da torre e da resistência do pé de torre. A tensão estabelecida pela cadeia de isoladores é função também do fator de acoplamento entre os cabos para-raios e os cabos fases. Dependendo do valor da tensão através da cadeia de isoladores, poderá

ocorrer a disrupção desta, e o surto atmosférico que se propagará nos cabos condutores terá amplitude máxima igual ao valor da suportabilidade da cadeia de isoladores. Neste caso, a frente de onda é bastante íngreme e sofre distorções até atingir a subestação.

O estudo de coordenação de isolamento, no caso de descargas atmosféricas em subestações, é desenvolvido de maneira determinística. A avaliação do nível das sobretensões na subestação, devido a descargas diretas e indiretas que incidem nas linhas de transmissão, leva em conta uma margem de segurança geralmente de 5% para isolamento auto-recuperante (isolamento no ar), e de 15% para os terminais de equipamentos da subestação. Estas margens de segurança referem-se à tensão suportável de impulso atmosférico normalizada, NBI ou BIL dos equipamentos, conforme recomendado pela norma de coordenação de isolamento [5.15]. As margens de segurança visam a compensar os aspectos do envelhecimento do isolamento durante o tempo de vida útil dos equipamentos, as diferenças de características de proteção dos para-raios e as aproximações consideradas nos dados e simulações.

As simulações de descargas atmosféricas precisam levar em consideração as piores condições de imposição de descargas atmosféricas na subestação, como a amplitude das correntes, os tempos de frentes de onda, a resistência de pé de torre mais elevada, a consideração da tensão de 60Hz pré-descarga e a configuração topológica da subestação. Geralmente, condições topológicas degradadas da subestação, com menor número de circuitos conectados, são as mais desfavoráveis. O surto de descarga atmosférica, ao atingir a subestação, sofre reflexões e flui pelos circuitos internos disponíveis da subestação, assim como retorna pelos circuitos externos (linhas conectadas). Desta forma, quanto maior o número de circuitos conectados à subestação e mais completa for a sua topologia, menores serão os níveis das sobretensões decorrentes das descargas atmosféricas.

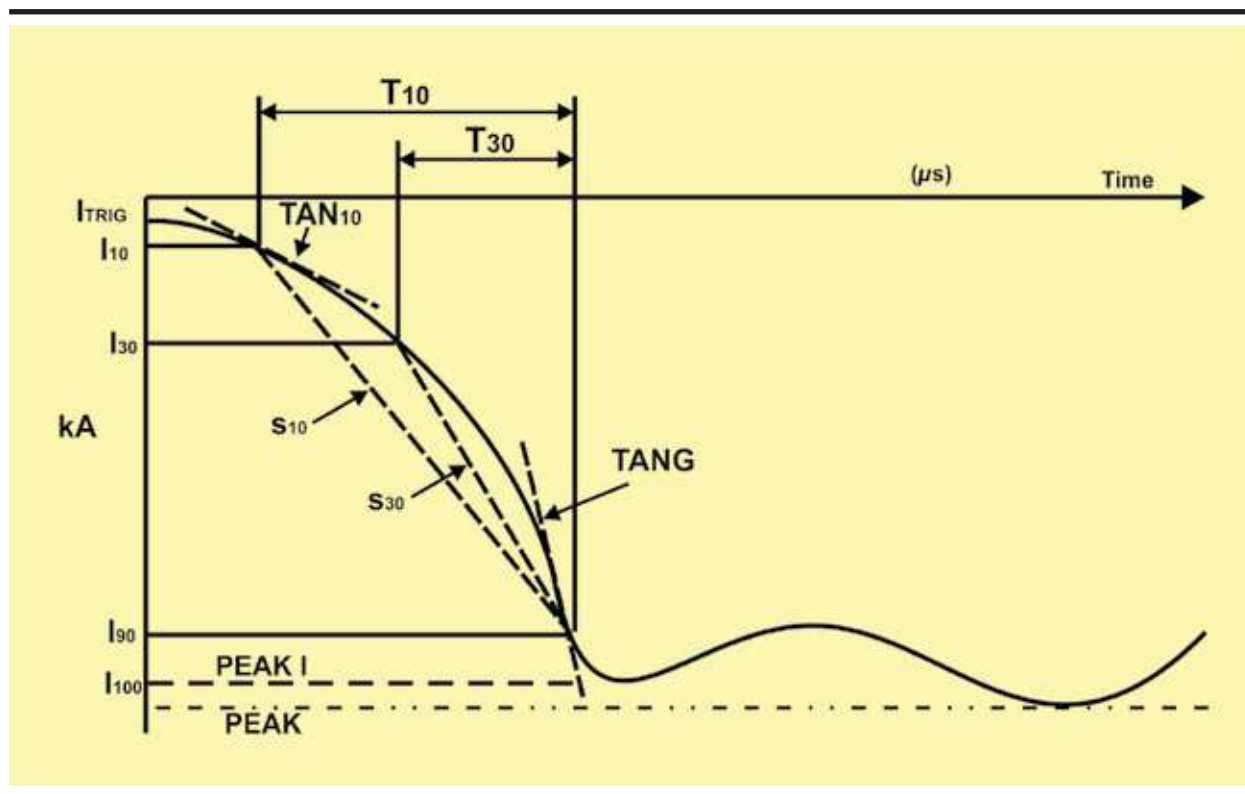
A proteção contra surtos atmosféricos é obtida pelos para-raios e se relaciona com a distância dos equipamentos a ser protegidos. Em função das ondas incidentes e refletidas em pontos no interior de uma subestação, podem surgir sobretensões em patamares críticos, e, de maneira geral, quanto maior a distância entre os para-raios e os equipamentos, maiores serão as sobretensões incidentes sobre esses equipamentos.

Os para-raios de entrada de linha de transmissão são particularmente importantes para a limitação dos surtos atmosféricos que trafegam no interior da instalação, pois os mesmos já limitam os surtos quando estes adentram a subestação.

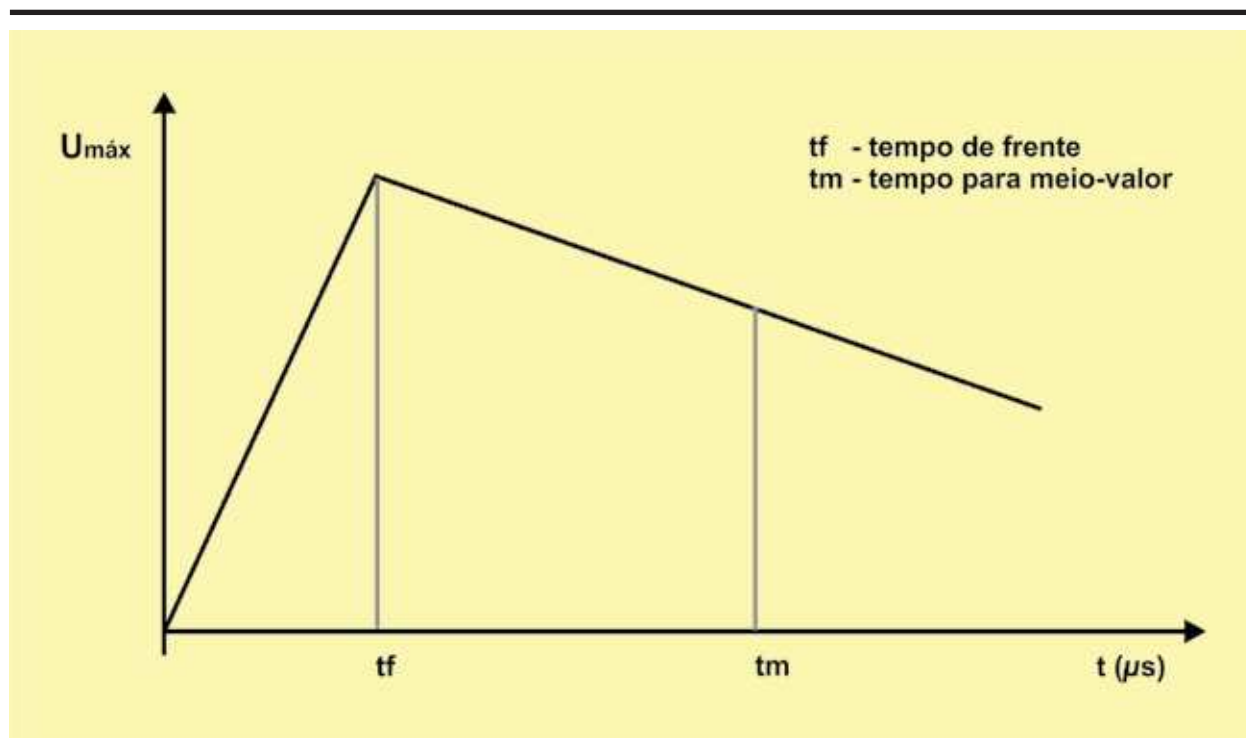
O estudo de coordenação de isolamento para as subestações da Rede Básica deve ser realizado por simulação com programas digitais, como, por exemplo, o ATP, devendo-se levar em consideração, na modelagem, o detalhamento da configuração da subestação, com as distâncias, os parâmetros das linhas de transmissão, os cabos para-raios e demais equipamentos da subestação.

3.2.13.2. Modelagem do Surto Atmosférico

Fisicamente, o surto atmosférico é caracterizado por um impulso de corrente. Desta forma, a sua representação mais precisa é modelar o impulso de corrente no programa de simulação, de acordo com as características de forma e amplitude, descritas em referências técnicas reconhecidas internacionalmente [5.16, 5.17 e 5.18]. Tal modelagem precisa ser muito criteriosa, pois a forma e a amplitude do surto de corrente têm grande influência no nível das sobretensões atmosféricas que se propagam na subestação. AFigura 3.14 apresenta a forma de onda típica para o surto de corrente de uma descarga atmosférica. A adoção deste tipo de modelagem requer a seleção do valor máximo de corrente de descarga atmosférica representativa para a região em questão. Este valor deve ser implementado na modelagem adotada para o surto de corrente, cuja forma deve preferencialmente seguir as recomendações da referência [5.16], ou outra reconhecida internacionalmente.

Figura 3.14. Exemplo de Onda Típica do Surto de Corrente de uma Descarga Atmosférica [5.16]

A simplificação geralmente aceita na engenharia de subestações é a adoção de um surto de tensão que represente a onda de corrente propagável para o interior da subestação, devido ao surto atmosférico que atinge a linha de transmissão. Quando o surto de corrente se propaga pela linha, uma onda de tensão se dirige à subestação [5.3], onde Zc é a impedância de surto de sequência positiva da linha. Tal onda é representada na Figura 3.15 e corresponde à onda típica de surto atmosférico considerada nas normas de ensaios de equipamentos [5.15]. Para simulações de descarga direta por injeção de surto de tensão, os valores adotados de tempo de frente (tf) e de tempo de cauda (tm) são de 1 us e 50 us, respectivamente. Para descargas indiretas, os valores adotados são 0,5 us e 50 us.

- A determinação do valor de crista para as descargas simuladas por surto de tensão deve seguir os seguintes critérios:
- Para descargas diretas, a amplitude da tensão de surto é dada por Uc=Isurto/2 X Zc, onde Zc é a impedância de surto de sequência positiva da linha e Isurto é a crista do surto de corrente para descargas diretas determinada com auxílio do modelo eletrogeométrico;
- Para descargas indiretas, a amplitude da tensão é função da tensão de disrupção da cadeia de isoladores da linha de transmissão, ou seja, Uc= Um x (1 + 3.s), onde Um é o valor médio da tensão suportável para a cadeia de isoladores adotada na LT (geralmente obtida de catálogo de isoladores) e s é o desvio padrão para a suportabilidade de impulsos atmosféricos no ar (3% segundo a norma de coordenação de isolamento [5.15]).

Figura 3.15. Exemplo de Forma de Onda Típica da Descarga Atmosférica.

3.2.13.3. Diretrizes para o Estudo de Coordenação de Isolamento

O estudo deve ser desenvolvido em simulação determinística com programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, adotando-se, por exemplo, o programa ATP, com a aplicação das seguintes diretrizes básicas:

- Considerar a incidência de descargas atmosféricas diretas e indiretas que atinjam as linhas de transmissão nas proximidades das subestações, assim como as magnitudes e formas de onda estabelecidas de acordo com as considerações do item 3.2.14.1 do presente documento;

- Considerar, na modelagem da subestação, as distâncias entre as conexões de equipamentos e barramentos, conforme propostas no projeto básico da subestação;
- Devem-se analisar as condições de subestação com topologia completa e algumas condições com topologia degradada; a escolha das topologias degradadas deve ter como objetivo a maximização das sobretensões no interior da subestação;
- As impedâncias de surto das linhas de transmissão conectadas à subestação, assim como as impedâncias de surto dos barramentos da subestação, devem ser determinadas por rotina específica a este fim, como o Line Constants do ATP. Os cabos e feixes de condutores efetivamente utilizados no projeto precisam ser considerados na determinação das impedâncias de surto. É recomendável adotar-se a determinação das impedâncias de surto para a faixa de frequências compatível com aquelas verificadas para surtos atmosféricos. O valor de 1 MHz é comumente adotado;
- Caso se julgue conveniente, a linha de transmissão pode ter um modelo que leve em consideração a variação dos parâmetros com a frequências, como o modelo J. Marti do ATP. Este tipo de modelagem pode resolver problemas de sobretensões muito elevadas obtidas pela modelagem tradicional por impedância de surto, pois o modelo leva em conta a variação dos parâmetros com a frequência;
- Considerar a resistência de aterramento das torres, em caso de simulação de descarga indireta e com a modelagem do surto por onda de corrente. Para modelagem do surto por onda de tensão, não há necessidade de representação das torres;
- Considerar, na modelagem da subestação, a capacitância dos disjuntores, de chaves secionadoras, dos transformadores de corrente e de potencial, das buchas de transformadores, coluna de isoladores, além da característica dos para-raios para surto atmosférico;
- Como critério para a avaliação dos resultados das sobretensões, deve estabelecer-se uma margem de segurança de 5% para isolamento auto-recuperante (isolamento no ar) e de 15% para os terminais de equipamentos da subestação com relação à tensão suportável normalizada de impulso atmosférico NBI ou BIL dos equipamentos e da instalação.

3.2.13.4. Desenvolvimento das Simulações e Análises

As simulações devem resultar no mapeamento das sobretensões verificadas nos diversos pontos da subestação, barramentos e terminais dos equipamentos, no sentido de estabelecer os níveis de isolamento a ser especificados para os equipamentos da subestação, bem como as características nominais dos para-raios e recomendações quanto à localização (distâncias) dos equipamentos.

3.2.13.5. Apresentação dos Resultados

Os resultados das sobretensões aplicadas aos terminais dos diversos equipamentos e aos barramentos da subestação devem ser apresentados em tabelas e conter: o tipo da descarga (direta ou indireta); o local da sua aplicação; a configuração da subestação considerada na simulação; os valores das sobretensões máximas em (kVpico), verificadas em cada um dos equipamentos; e a indicação da Figura anexa ao relatório, incluindo a plotagem da forma de onda da sobretensão.

Devem-se também apresentar diagramas unifilares, plantas e cortes correspondentes à subestação, com indicação das distâncias associadas aos barramentos, equipamentos e para-raios.

O item 8.8 deste documento apresenta uma sugestão de itens a ser contemplados no relatório dos estudos de coordenação de isolamento, com exemplos e gráficos para apresentação desses resultados.

3.2.14. Estudos Associados à Compensação Estática Shunt (CER)

Os estudos associados à compensação estática shunt podem ser divididos em duas etapas.

Na primeira, são estabelecidas as condições de contorno sistêmicas visando a subsidiar o projeto do equipamento pelo fabricante. Esta fase deve ser desenvolvida pela Transmissora, conjuntamente com os estudos elétricos do projeto básico da instalação. Ela abrange todos os aspectos necessários a sua especificação.

Deve também ter como produto um documento de Especificação Básica do CER, que servirá como referência para a aquisição do equipamento. Este documento precisa conter, entre outras coisas, a configuração básica, as faixas de potência e de controle, as características de controle a ser atendidas, bem como os requisitos de desempenho harmônico a ser obedecidos e o lugar geométrico de impedâncias da rede a ser considerado no projeto dos filtros.

Por este motivo, nesta etapa deve ser realizada pela Transmissora a determinação das características de impedância harmônica, vista do ponto de acoplamento comum (PAC) da Rede Básica, no qual será instalado o compensador estático (CER).

A segunda etapa, a ser desenvolvida pelo fabricante, refere-se ao seu dimensionamento, a partir das características de contorno fornecidas na primeira etapa. O fabricante deve fornecer inclusive os modelos computacionais do CER, com base nas características e parâmetros finais do equipamento a ser utilizados em futuros estudos de sistema, com as ferramentas para estudos de fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e de transitórios eletromagnéticos.